

광 확산용 2차 렌즈 설계 기술 연구

(The Research of the 2nd Lens Design for Wide Angle Distribution)

주원돈* · 오상현

(Won-Don Joo · Sang-Hyeon Oh)

Abstract

Recently an optical diffusion of LED lamps has been studied actively. In this paper, the second lens applied to a cover of the LED lamp was analytically designed to having a wide angle distribution of light without diffuser characteristic by dispersing agent. In this process, We found a major factors that can help improve the performance of the lens. It is the refractive power of the lens, the Mie particle density of phosphor, and the arrangement of the LED. Through the final simulation, we can see the LED lamp is possible to get wide angle light distribution by proper source modeling and second lens designing. Also, we can see this simulated results are entirely consistent with measured data for light distribution. In this research, we present the shape of the second lens with wide angle distribution and derive the important factors for the second lens design.

Key Words : LED Lamps, Second Lens, Light Distribution, Wide Angle, Mie Density

1. 서 론

전 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가하면서 LED는 에너지 절감효과와 환경보전이라는 측면에서 선진국뿐만 아니라 국내에서도 국가적인 과제로서 조명용 LED 광원 및 LED 조명기기의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

기존 조명인 백열등은 2012년부터 생산 규제에 들어가고 형광등은 희토류 가격 상승에 따라 오히려 20%

이상 가격이 오르고 있는 반면에 LED 조명은 가격인하도 빠르게 이뤄지고 있고 효율 측면에서도 기존 조명과 충분히 경쟁할 수준에 도달해, 곧 기존조명을 대체할 것으로 전망하고 있다. 특히 한미 FTA와 일본 원전사태로 인한 LED수요가 급증하면서 LED조명의 사용이 급속도로 늘어날 것으로 예측하고 있다. 이에 따라 국내에서도 기존에 활약해온 삼성, LG 외에 동부, SK, 포스코 LED 등 신규플레이어들이 가세하면서 국내 업체들도 중소기업과의 협력을 통한 LED 조명시장의 개화에 힘쓰고 있다[1-2].

이와 같이 국내외 제조사들에서 LED 광원을 이용한 조명용 등 기구 개발이 활발하게 진행되고 있으며 현재 LED 등기구의 공급이 대기업뿐만 아니라 중소기업까지 다양하게 증가하고 있다.

* 주저자 : 삼성전자 수석연구원
Tel : 031-200-2215, Fax : 031-8041-1914
E-mail : wdoptic@naver.com
접수일자 : 2012년 3월 31일
1차심사 : 2012년 4월 6일
심사완료 : 2012년 5월 9일

등 기구는 효율 향상뿐만 아니라 배광을 향상시키고 제어하는 부분이 매우 중요하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 현존하는 백열등 대체용 LED 램프들을 살펴보면 PCB기판을 다양하게 하여 LED를 배치하거나 커버에 임의로 확산 특성을 주는 방법이 주를 이룬다.

LED를 조명 용도에 효율적으로 적용하기 위해서는 조명 공학적 목표 배광을 설정하고, 이를 실현하기 위한 광학설계 및 광 효율 극대화 기술이 필요하다[3]. 따라서 본 연구에서는 광 효율을 감소시키는 원인 중 하나인 확산제에 의한 Diffuser 특성을 적용하지 않고 2차 렌즈의 형상만으로 광각의 배광 분포를 구현할 수 있도록 렌즈를 설계하여 LED 램프의 적용하였다.

2차 렌즈 설계 시 광원에 의한 오차를 최대한 줄일 수 있도록 광학적 특성을 고려하여 LED 광원을 모델링하였고, 설계된 2차 렌즈의 성능을 향상시키기 위한 LED의 최적 위치를 도출해 냄으로써 최적 설계에 대한 요소를 확보하는 동시에 렌즈 형상에 따른 LED 배치의 중요성도 언급하였다[4].

최종적으로 시뮬레이션을 통해 최적화된 2차 렌즈 및 LED 램프를 제작하고 성능평가를 통하여 비교분석하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경

광각의 배광 분포를 갖는 2차 렌즈를 설계하기 위해 양면이 구면이고 곡률의 부호가 같은 오목 매니스커스(- meniscus) 렌즈 형태를 적용하고자 한다.

렌즈는 광선속을 변화시키는 능력에 따라 (+)렌즈와 (-)렌즈로 구분되는데 광각의 배광 분포를 갖기 위해서는 광선속을 발산시키는 능력을 갖는 (-)렌즈 즉, Negative Lens의 형태를 가져야 한다[5].

그림 1은 2차 렌즈를 설계하기 전에 렌즈의 굴절력을 구하고 2차 렌즈의 형태를 구상하기 위한 그림이다. 그림 1에서 굴절률 n_1 , n'_1 은 2차 렌즈의 전면의 전·후 측 굴절률이고 굴절률 n_2 , n'_2 은 후면의 전·후 측 굴절률이다. 굴절률 n_2 , n'_1 은 렌즈의 굴절률이

기 때문에 \bar{n} 으로 표시하고 굴절률 n_1 , n'_2 은 공기 속에 있기 때문에 굴절률을 1로 한다. 길이 t 는 렌즈의 중심두께이고 r_1 , r_2 는 전·후면의 곡률 반경이다.

여기서 r_1 및 t 는 고정하고 r_2 를 변수로 하여, 굴절력의 변화를 살펴보았다. 굴절력의 변화를 보기 위한 관계식은 다음과 같다[6].

- 전면의 굴절력 : $D'_1 = \frac{n'_1 - n_1}{r_1}$
- 후면의 굴절력 : $D'_2 = \frac{n'_2 - n_2}{r_2}$
- 총 굴절력 : $D' = D'_1 + D'_2 - \frac{t}{n} \cdot D'_1 \cdot D'_2$

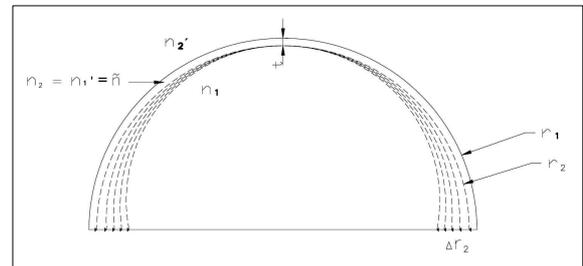


그림 1. 렌즈의 굴절력 유도
Fig. 1. Derivation of the lens power

2.2 2차 렌즈 설계

현재 많이 상용화 되어있는 일반적인 벌브형태를 유지하기 위해서 본 연구에서는 2차 렌즈의 두께 t 값을 고정한 후 렌즈의 내부 곡률 r_2 값을 변수로 설정하고 변수의 변화(Δr_2)에 따른 굴절력(D')의 변화된 값을 도출하였다.

그림 2는 r_2 값의 변화(Δr_2)에 따른 굴절력(D')의 변화를 그래프로 나타낸 그림이다. 그림과 같이 r_2 값이 줄어들면서 렌즈의 형태가 Negative Lens의 형태를 갖게 되는데 Negative Lens의 특성상 광선속을 발산하는 특성을 갖기 때문에 본 연구의 목적인 배광 각도를 넓히기 위한 방법으로 Negative Lens의 형태를 갖도록 설계하는 것이 적합하다고 할 수 있다.

위와 같은 방법을 바탕으로 광학계 설계프로그램인 Zemax를 이용하여 벌브 형 LED 램프에 적합한 2차

렌즈를 설계하였다.

Negative Lens의 형상을 띄고 있는 2차 렌즈는 설계에 들어가기 전에 사출 성형 시 발생할 수 있는 문제를 반드시 고려하여야 한다.

렌즈의 중심 부분과 가장자리 부분의 두께 차이가 크기 때문에 발생할 수 있는 제품의 수축 문제, 렌즈의 중심 부분의 두께가 얇기 때문에 발생할 수 있는 수지의 흐름문제 그리고 r_2 값이 줄어들어 따라 제품을 취출 시 발생할 수 있는 제품 파손 문제 등을 고려하여 설계하였다.

r_2 값의 선정은 중심 두께와 Edge 두께의 비가 3 이하일 때 사출이 용이하고 최대 3.75까지 가능하다 하여 그 비가 3.75인 29[mm]로 선택하였다.

설계된 2차 렌즈의 형상은 그림 3에 나타내었다.

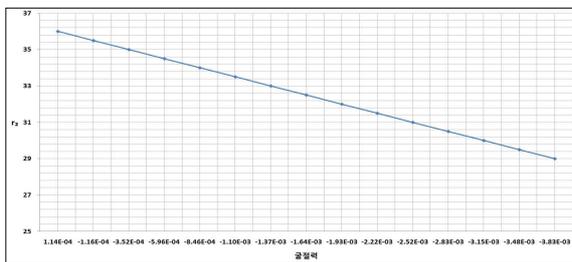


그림 2. r_2 값의 변화(Δr_2)에 따른 굴절력(D')의 변화
Fig. 2. Change of lens power according to r_2 values

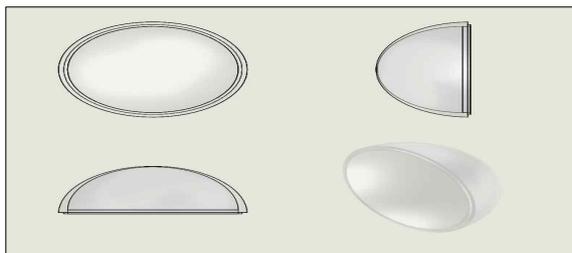


그림 3. 설계된 2차 렌즈의 형상
Fig. 3. Shape of 2nd lens

2.3 LED 세부 모델링

시뮬레이션을 통하여 설계된 2차 렌즈의 성능을 분석한 결과와 실제 측정을 통하여 얻은 결과 값의 오차를 최대한 줄이기 위해서는 LED 광원이 정확한 테

이터에 근거하여 세부적으로 모델링 되어야 한다[7].

주요 LED 제조회사에서는 LED의 특징 및 제품의 세부적인 특성까지 Data sheet를 통해 다양하게 제공하고 있을 뿐만 아니라 각 회사의 홈페이지를 통해 광학적 또는 기구적인 설계 데이터를 제공하고 있어 보다 간단하게 LED 모델링에 접근할 수 있다.

그러나 아직도 다수의 LED가 광학 특성 측정 결과에 따른 정보가 미흡하기 때문에 모델링에 들어가기 앞서서 LED의 세부적인 부분까지 정밀하게 측정하고 그를 토대로 광학적 특성을 고려한 모델링이 되어야 실제 LED 특성에 근접한 결과를 도출해 낼 수 있다. 즉 LED의 몰드, 리드 프레임, 그리고 실리콘 렌즈 등의 실측 데이터를 정확하게 입력하고 각각의 특성에 맞는 재질을 선택하여 적용하여야 한다. 또한 빛을 발산하는 LED Chip의 크기 및 형광체의 특성에 따라 LED의 성능 및 특성이 좌우되기 때문에 정확한 모델링과 검증이 요구된다[8].

본 논문에서는 램버시안 형태의 배광분포로 125[°]의 시야각을 가지는 C사의 LED를 기본 모델로 삼고 그 특성에 맞게 모델링 하였으며 본 논문에 적용한 LED의 제원을 표1에 정리하였다. 그림 4는 모델링한 LED의 기본 설계도이고 그림 5, 6은 C사에서 기본으로 제공된 제원과 배광 특성 그래프를 나타내고 있다[9].

표 1. XLAMP XP-G LED의 제원
Table 1. Spec of XLAMP XP-G LEDs

제품	Color	CCT Range	Luminous Flux @ 350mA (lm)	Viewing Angle (FWHM)
C사 LED	Cool White	5,000~8,300[K]	139	125 degree

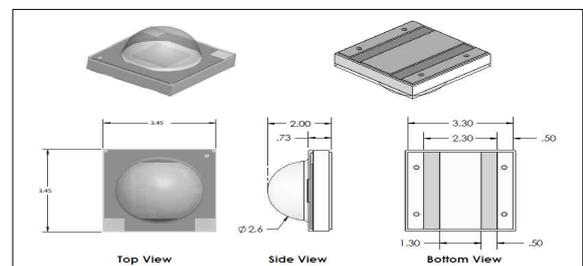


그림 4. LED 기본 설계도
Fig. 4. Basic drawing of LED

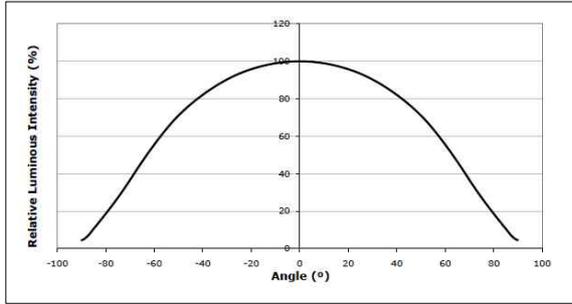


그림 5. LED의 배광 분포 특성
Fig. 5. Luminous intensity distribution of LED

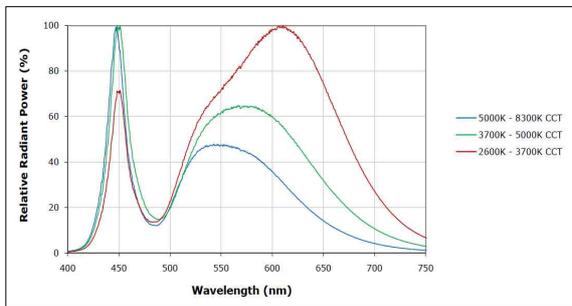


그림 6. LED의 상대 분광 분포
Fig. 6. Relative spectral power distribution of LED

조명 설계 프로그램인 LightTools를 이용하여 LED의 주요 구성 요소인 몰드, 리드프레임 및 실리콘 렌즈의 형상 등을 모델링한 후 실제 측정된 데이터를 토대로 Chip 및 형광체를 모델링 한다. 모델링된 각각 구조의 재질 특성에 알맞은 광학적 특성 (굴절률, 반사율, 흡수율, 투과율 등)을 정의하고 광속 및 스펙트럼 데이터를 제시된 제원에 적합하게 시뮬레이션하는데, 이 과정에서 형광체의 Mie Particle Density라는 요소가 변화함으로써 LED의 발광 특성에 영향을 미치게 된다. 아래 그림 7, 8은 Mie Particle Density 변화에 따른 광속 및 스펙트럼의 변화를 분석한 그래프이다.

기본적으로 제시된 C사의 LED 제원에 가장 적합한 발광 특성 데이터를 도출해 낸 결과, Mie Partical Density가 9.0×10^6 ($1/mm^3$)일 때, 광속은 139.42248 [lm], CCT(Correlated color temperature)는 6665[K]로 모델링한 LED의 성능이 실제 LED의 성능과 거의 유사하다는 것을 알 수 있었다.

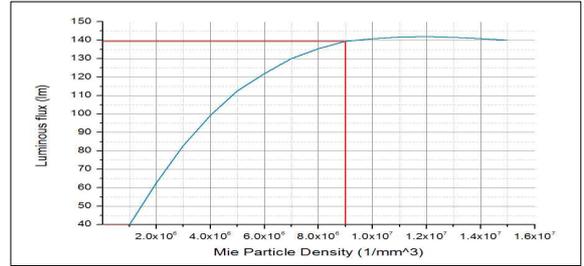


그림 7. Mie Particle Density에 따른 광속 변화
Fig. 7. Change of luminous flux by Mie Particle Density

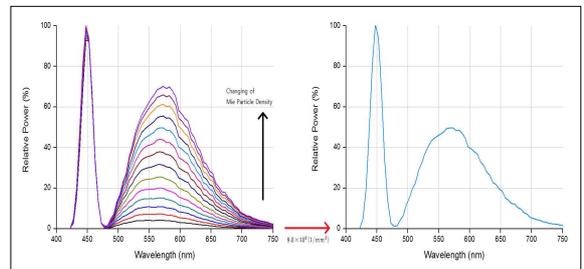


그림 8. Mie Particle Density에 따른 스펙트럼 변화
Fig. 8. Change of Spectrum by Mie Particle Density

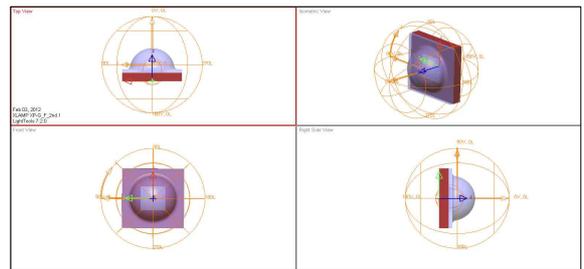


그림 9. 모델링된 LED의 4면 레이아웃
Fig. 9. 4 pane layout of designed LED

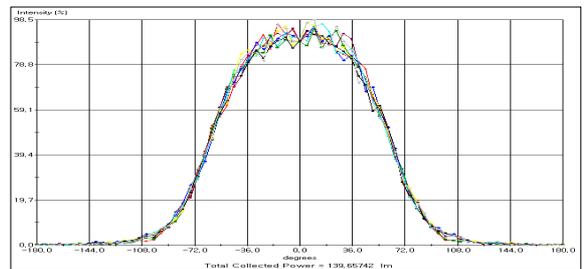


그림 10. 모델링된 LED의 배광 분포
Fig. 10. Luminous intensity distribution of designed LED

그림 9는 최종적으로 모델링된 LED의 4면 레이아웃이고, 그림 10은 모델링된 LED의 배광 분포 형태를 나타낸다. 제조사가 제시한 배광분포인 그림 5와 모델링을 통하여 구한 배광 분포인 그림 10의 배광 분포가 유사함을 볼 수 있으며, 이에 따라 2차 렌즈의 성능 시뮬레이션 및 분석을 위해 필요한 광원을 확보하였다.

2.4 LED 배열의 최적 위치 도출

배광 각도에 영향을 미치는 중요한 요인 중에 하나가 LED의 배열이다.

벌브 형 LED 램프뿐만 아니라 MR(Multifaceted reflector)이나 PAR(Parabolic aluminized reflector) 타입 등 여러 타입의 조명 기구가 2차 렌즈를 이용하여 광학적 성능을 컨트롤 하는데 각각의 2차 렌즈 특성에 맞게 LED의 배열이 이루어져야 원하는 성능을 얻을 수 있다[10].

여러 형태의 배열이 존재하겠지만 본 연구에서는 LihgtTools라는 조명설계 프로그램을 이용하여 8개의 LED를 r_1 의 중심을 지나는 단면에 원형 배열하고 그 원의 R값을 변화시켜 효율대비 넓은 배광분포를 갖는 배열을 찾아내고, 그 위치에서 광축 방향으로 Shift에 따른 배광 각도 변화를 분석함으로써 가장 최적의 LED 위치를 도출하였다.

8[W]의 LED 램프의 전력을 맞춰주기 위해 1[W]의 LED를 8개 원형 배열하고 각각 LED의 중심점을 연결한 원의 곡률을 Array R값이라고 한다.

Array R값은 19~26[mm]까지 0.5[mm] 단위로 배열하여 분석하고, 광축 Shift에 따른 배광 분포 변화 분석은 LED를 배열한 원의 중심인 $xyz(0,0,0)$ 을 기준으로 하여 ± 1 [mm]까지 0.2[mm] 단위로 Shift시키면서 분석하였다.

LED의 원형배열과 광축 Shift에 따른 배광 각도의 변화를 그림 11에 나타내었다.

그림 11로부터 최적의 Array R값이 21[mm]임을 알 수 있고, 광축으로의 Shift값은 -0.2~0 사이에서 거의 동일한 값을 가짐을 볼 수 있다. 본 논문에서는 광축 Shift값을 -0.1로 선택하여 시뮬레이션하였다.

2차 렌즈의 제작에 들어가기 전에 앞에서 도출한 최적의 위치에 LED 및 2차 렌즈를 배치하고 LED 램프의 형태로 재구성한 후 최종적으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과, 배광 분포가 150° 이상이며 광 효율은 89.303[lm/W]인 것을 알 수 있었다.

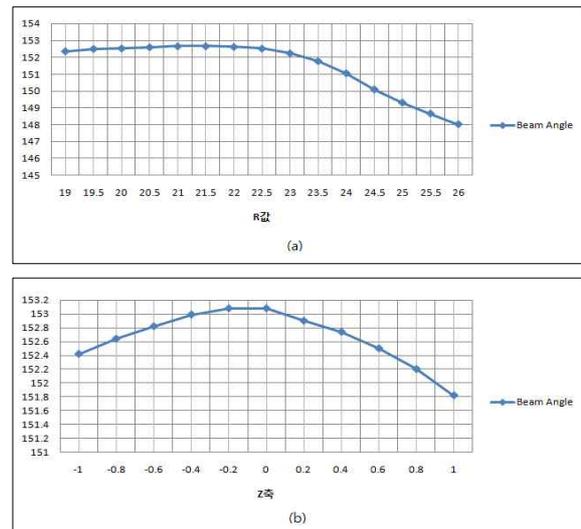


그림 11. 배광 분포 변화 분석
(a) Array R 값의 변화에 따른 배광 분포 변화
(b) 광축 shift에 따른 배광 분포 변화
Fig. 11. Analysis of the luminous intensity distribution (a) Luminous intensity distribution by changing Array R values (b) Luminous intensity distribution by Shifting on axis

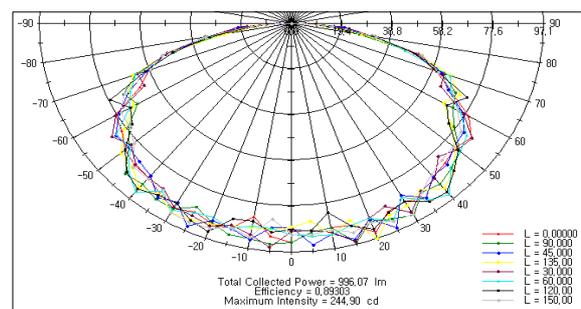


그림 12. LED 램프의 배광 분포 특성
Fig. 12. Luminous intensity distribution of LED lamp

그림 12는 Far Field Detector를 통해 얻어진 LED램프의 배광 분포 특성을 나타내고, 표 2는 광도 분포가

중심축을 기준으로 20[°]씩 Slice 될 때 중심축 기준 50[%]에서의 배광 각도 값과 그 값들의 평균을 나타낸다.

표 2. 중심 축 기준 50[%]에서의 배광 각도
Table 2. Widths at 50[%] of center value (Beam Angle)

	Slice Angle	Full Width	Half Width +	Half Width -
1	0	150.353	75.329	-75.024
2	20	150.439	75.712	-74.727
3	40	150.708	75.200	-75.508
4	60	150.219	75.568	-74.651
5	80	152.530	76.053	-76.476
6	100	151.086	74.905	-76.181
7	120	148.685	73.625	-75.060
8	140	150.959	74.843	-76.115
9	160	150.625	75.120	-75.504
10	180	150.353	75.329	-75.024
	Average	150.592	75.219	-75.373

3. 제작 및 성능 평가

설계된 2차 렌즈를 사출성형을 통해 제작하였고 시 사출한 2차 렌즈를 Mock-up으로 제작된 램프의 기구부에 장착하여 성능 평가하였다. 배광 성능을 평가하기 위해서 한국광기술원에 배광 시험을 의뢰하였다. 그림 13은 제작한 2차 렌즈가 장착된 LED램프 형상으로 시험결과 배광 분포는 그림 14와 같고, 광 효율은 88.02[lm/W]로 측정되었다[11]. 그림 12와 그림 14의 비교로부터 배광 분포가 시뮬레이션과 유사함을 볼 수 있으며 광 효율의 Error가 약 0.99[%]임을 볼 수 있다.

그림 14를 살펴보면 150[°] 이상의 만족스러운 배광 분포를 보여주고 있는데 시뮬레이션에서 보여줬던 램버시안 형태의 배광 분포가 아닌 중심 부분이 약간 들어간 Batwing형태의 분포를 나타내고 있다.

이 문제의 원인은 웰드라인에 의한 광 손실로 판단된다. 사출성형 시 제품 하단 면에서 상측으로 수지가

채워져 올라가게 되는데 이 때, Gas가 상측 가운데로 몰리게 된다. 이 과정에서 웰드라인이라는 물결형상의 무늬가 발생하는데, 이로 인한 광 손실이 발생하면서 Batwing형태의 분포를 띄게 된 것으로 여겨진다. 특히, 중심과 Edge의 두께 비를 3.75로 크게 선택함으로써 인하여 수축에 의한 웰드라인이 발생되었다고 예상된다.



그림 13. 2차 렌즈가 장착된 LED램프
Fig. 13. LED lamp equipped with 2nd lens

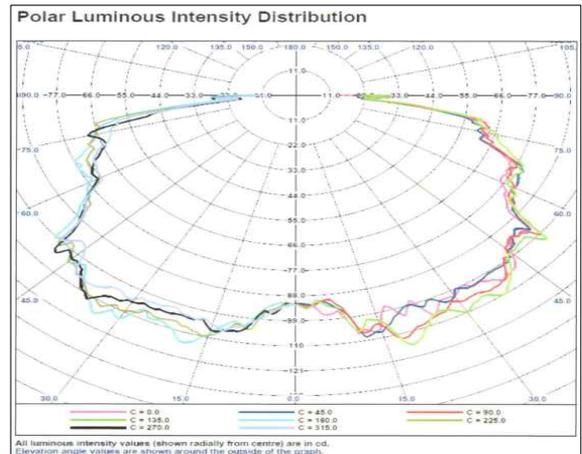


그림 14. 측정된 배광 분포 특성
Fig. 14. Measurement of luminous intensity distribution

4. 결론

본 논문의 연구를 통하여 광원의 모델링에 주요 발광 특성인 광속과 Spectrum은 Mie particle density의 조절을 통하여 확보할 수 있음을 알 수 있었으며, 광각

의 배광 분포와 높은 광 효율 확보는 2차 렌즈의 형상 및 LED의 배열을 통하여 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

LED 모델링에서 도출된 최종적인 Mie particle density는 9.0×10^6 ($1/mm^3$) 이고, 2차 렌즈 곡률 r_2 값은 중심과 Edge의 두께 비가 3.75가 되는 29[mm]를 선택하였다. 이로부터 LED의 위치를 결정하는 최적의 원형 배열 R값과 광축으로의 Shift 값이 각각 21[mm]와 -0.1[mm]임을 도출하였다.

본 연구를 통해 도출된 인자들을 활용하여 제작 측정한 결과 값과 시뮬레이션 결과 값을 비교 분석한 결과, 배광 분포가 150[°]정도로 유사함을 알 수 있었으며, 광 효율은 88.02[%]로 시뮬레이션 값과 약0.99[%]의 Error율을 갖는 것을 알 수 있었다.

결국 확산제 특성을 갖는 Diffuser를 사용하지 않고 2차 렌즈의 설계 기술을 통하여 광각의 배광 분포를 갖는 LED 램프의 구현이 가능함을 볼 수 있었다.

References

[1] Hyeon Jung Jung , “2012 LED Industrial Inflation?”, Energy Economics, 2012.
 [2] Hee Min Ahn, “This year a lot of favorable factor in the LED Market.”, Energy Economics, 2012.
 [3] Chol Kon Chee, Hoon Kim, Chin Woo Yi, “Lighting Designer Certification Manual”, Korean National Committee of CE, 2011.
 [4] William A. Parkyn, David G. Pelka, Irradiance-Redistribution Lens and its Applications to LED Downlights, US 7,618,162 B1, Nov. 17, 2009.

[5] John E. Greivenkamp, Field Guide to Geometrical Optics, SPIE, 2004.
 [6] Kyung Ho Shin, Sang Bin Song, In Seon Yeo, “The Design of Lens for Power LEDs Spot Light”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 2004.
 [7] Jeong A Han, Jong Tae Kim, “Modeling and Analysis of Optical Property For High Power LED”, Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 18, Number 2, April 2007.
 [8] M.K. Hwang, Su Ho Ahn, Gi Hyeon Ban, Seung Wook Baek, “Optical Design Theory and Application of LED Lighting I”, Korea Institute of Lighting Technology, 2010.
 [9] www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp, Data sheet, Cree, Inc. 2009-2010.
 [10] Shoumei Gakkai, “Lighting Handbook(Korean Language edition)”, SEONG AN DANG Publishing Co., 2010.
 [11] IES LM-79-08, Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products, 2008.

◇ 저자소개 ◇



주원돈 (朱願墩)

1963년 4월 6일생. St. Petersburg Institute Fine Mechanics and Optics in Russia(IFMO, Russia) 광학 전공 졸업(박사). 현재 삼성전자 수석연구원.



오상현 (吳尙炫)

1986년 6월 26일생. 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지대학원 광-나노학과 재학생.